昆仑山北坡冰川湖变化及其溃决风险评估

陈 满[1]， 陈亚宁[2]， 方功焕[2]， 李玉朋[2]， 孙慧兰[1]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室/干旱区生态安全与可持续发展重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：探究昆仑山北坡冰川湖时空变化及冰川湖溃决洪水（Glacier lake outburst flood，GLOF）风险评估对区域水资源安全和生态发展具有重要意义。基于Google Earth Engine（GEE）遥感计算平台分析昆仑山北坡冰川湖近30 a的变化特征和GLOF风险评估模型对当前的冰碛湖进行灾害与风险评估。结果表明：（1）1990—2023年昆仑山北坡冰川湖呈显著增长趋势，冰川湖的数量从1990年的248个增加到2023年的925个（增加了2.73倍），面积从1990年的14.99 km^2增加到2023年的54.83 km^2（增加了2.66倍），冰川湖在昆仑山北坡西部高海拔山区增加显著。（2）通过对2023年GLOF风险评估分析得出，灾害水平在叶尔羌河流域最高（约占47.2%），其次是和田河流域（约占15.7%）。风险水平较高是叶尔羌河流域（约占50.8%），叶尔羌河流域高风险冰川湖占整个昆仑山北坡高风险冰川湖的60.7%。（3）1990—2023年冰川湖的增长趋势与区域气候变化相关，山区降水增加和冰川积雪消融是冰川湖扩张的主要原因。开展冰川湖溃决洪水风险评估可为干旱区水资源可持续利用，为下游地区防灾预警提供科学依据和支撑。

关 键 词：冰川湖；溃决洪水灾害；风险评估；昆仑山北坡

文章编号：1000－6060(2024)10－1628－12(1628～1639)

冰川湖溃决洪水（Glacier lake outburst flood，GLOF）指在冰川作用下，冰川湖（如冰川阻塞湖、冰碛阻塞湖、冰内湖、冰下湖等）坝体突发性溃决或漫溢而引发的溃决洪水，其突发性强，影响范围与危害程度较大，极易对位于冰川湖下游地区的人民生命财产安全和社会生态环境造成灾害与损失[1-2]。在全球气候变暖的背景下，高山冰川出现普遍的消融与退缩[3]，同时也促进了新冰川湖的进一步形成和发展[4]，随着气温的持续升高，永久积雪和多年冻土也在加剧消融[5]，未来将导致冰川湖的面积、数量和蓄水量将进一步扩张[6-7]。对于中国西北干旱区高寒山区来说，冰川湖的扩张和水储量的增加在一定程度上减缓了因气候变暖而导致的区域冰川水资源的亏损[8]，为干旱山区提供了宝贵的水源，有效利用这些冰川湖水资源可促进经济和生态环境的可持续发展[9-10]。然而，冰川湖的持续扩张、水量增加的同时也伴随着GLOF风险的增加[11]。GLOF往往对源头及下游地区数千公里居民住宅、基础设施建设、人民的生命财产构成了威胁[12-13]。因此，探究GLOF灾害不仅能真实记录区域气候与冰川的变化，并能及时准确掌握和监测冰湖分布状况及发展趋势，科学合理地对干旱区的冰川湖进行溃决洪水风险评估，对未来区域经济发展、防灾预警等具有重要意义[14]。

GLOF已成为高寒山区的自然灾害之一，因此关于GLOF的研究近年来受到很多学者的关注和青睐。目前，GLOF研究主要集中在区域尺度上或较活跃的冰川湖动态变化分析[15]、基于水文动力模型模拟其溃决过程[16]、识别潜在的冰川湖危险性评估及冰川湖溃决洪水灾害事件的重建等[17-18]，目前中国开展的冰川湖溃决洪水研究主要集中在“第三极”地区[19-20]，包括昆仑山、天山、西藏、昆仑山北坡

收稿日期：2024-03-18； **修订日期：**2024-05-08
基金项目：第三次新疆科学考察——昆仑山北坡水资源潜力及利用途径科学考察项目(2021xjkk0100)资助
作者简介：陈满(1997-)，女，硕士研究生，主要从事水文灾害过程研究. E-mail: 107622022210545@stu.xjnu.edu.cn
通讯作者：陈亚宁(1958-)，男，研究员，主要从事干旱区水资源与地表过程研究. E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

叶尔羌河流域等不同区域和流域。对其研究主要包括：基于遥感对冰川湖的信息进行提取[21-22]，冰川湖在不同区域和流域的气候变化特征分析及驱动因素分析[23]，较活跃冰川湖溃决灾害重建[24]，冰川湖溃决潜在识别及模拟和预警等。研究分析表明，亚洲高山地区及全球高山冰川和积雪都存在普遍退缩、消融，冰川补给为主的冰川湖，占了第三极地区湖泊数量和面积的70%，气候变暖引起的冰川融水是直接导致冰川湖的数量增加和面积扩张的主要因素[25]。

昆仑山北坡位于塔克拉玛干沙漠南缘，是世界上中低纬度地带冰川分布最集中的地区。研究昆仑山北坡冰川湖时空分布特征可以为区域水资源生态保障、水资源生态效益及未来土地利用提供参考，同时对GLOF风险进行定量评估，可以为该区域冰川湖溃决洪水防灾预警提供理论依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

昆仑山北坡位于塔克拉玛干沙漠南缘，中国西北部，地理位置介于74°80′~93°02′E，34°83′~40°55′N之间（图1），生物多样性丰富，是我国西部干旱区重要的保护区之一[26-27]。孕育了众多的河流（如叶尔羌河、和田河、克里雅河等），是丝绸之路经济带核心区建设中南部的一个重要通道，也是干旱区水资源可持续利用和支撑的保障。昆仑山北坡由库木库里盆地、车尔臣河流域、克里雅河流域、和田河流域、叶尔羌河流域5个流域和盆地组成。降水季节性明显，主要集中在夏季，冬季降水较少，年均降水量仅34.8 mm。

1.2　数据来源

从GEE平台获取了Landsat系列遥感影像和Sentinel-2A/B MSI遥感影像进行冰川湖的边界提取，数据来源于United States Geological Survey（USGS）website（http://earthexplorer.usgs.gov/）和Copernicus Open Access Hub（COAH）（https://dataspace.copernicus.eu/）。考虑到遥感卫星影像在长时间序列中获取存在一定的困难，为了减少影像对冰川湖提取的影响（如云层覆盖度、地形因素、积雪覆盖等），主要选取了冰川消融盛期（7—9月）的遥感影像，所选的影像云层覆盖度均小于5%。分别提取了1990、2000、2010、2020年和2023年5个窗口时期，构建了昆仑山北坡冰川湖的数据集。

数字高程模型（DEM）数据主要是30 m空间分辨率的AW3D30 v2.2数据和90 m空间分辨率的MERIT DEM。AW3D30是由搭载陆地观测卫星（ALOS）上全色遥感立体测绘仪（PRISM）获取制作的全球数字表面模型（DSM），AW3D30高分辨数据能够获取更为详细的地形特征属性，因此主要用于获取冰川湖的相关地形属性。MERIT DEM是通过消除SRTM3 v2.1和AW3D30 v1数据的多种误差成分得到的全球高分辨率地形数据，在本文中主要用于冰川湖溃决洪水灾害和风险评估。数据来源National Aeronautics and Space Administration（NASA）数据网站（https://nasadaacs.eos.nasa.gov/）和ALOS World

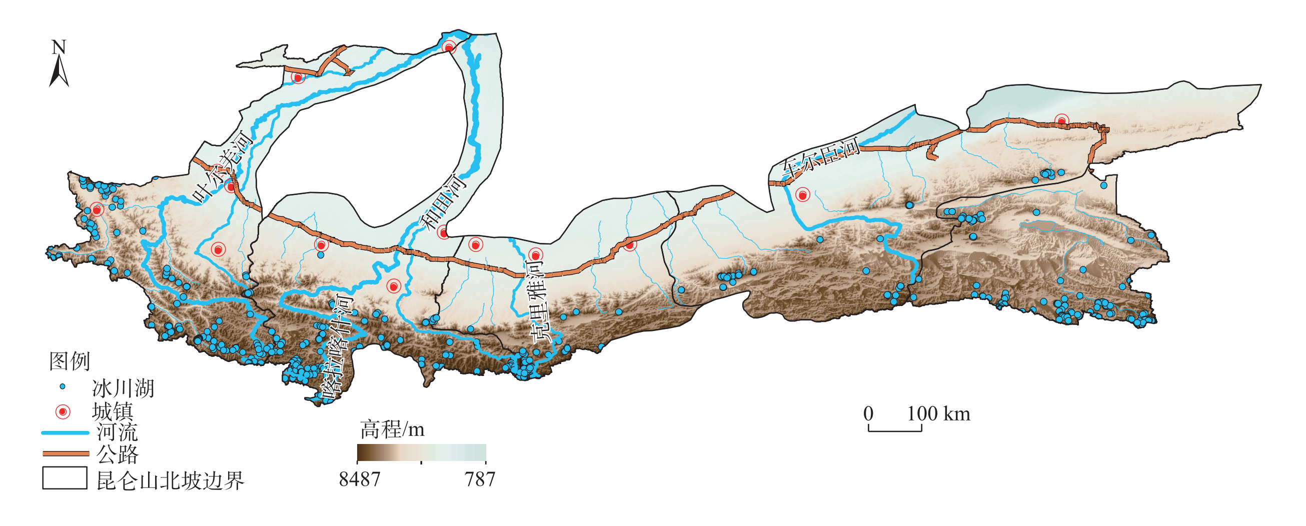


图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

3D-30 m Global Digital Surface Model(AW3D30)数据网站(https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/),这2个数据是当前同等空间分辨率下精度较高的数据[28]。由于本研究区缺少气象观测站点,为分析冰川湖的变化原因,采用了1990—2020年"第三极"地区长时间序列高分辨(1/30°)日尺度气温、降水数据集,分析气候变化与冰川湖时空变化关系,气象数据来源国家青藏高原科学数据中心(https://cstr.cn/18406.11.Atmos.tpdc.272763),高亚洲冰湖编目数据集[29]源于国家冰川冻土沙漠数据中心(http://www.ncdc.ac.cn)。本文使用的冰川数据集Randolph Glacier Inventory 7.0(https://www.globalglacierchanges.org/rgi/download/),用于确定冰川湖的分布范围,Open Street Map(OSM)数据是目前使用较广泛的开放地图数据,OSM数据(http://www.openstreetmap.org)具有较高的时效性,本文用于计算GLOF的暴露性评估。

1.3 研究方法

1.3.1 冰川湖边界提取 冰川湖多位于人迹罕至的高海拔地区,难以有效进行实地调查监测,这也是目前研究大多数基于遥感手段和技术方法的主要原因。借助第三次科学考察,2021年启动了昆仑山北坡水资源潜力及开发利用途径科学考察项目,并于2022年成功在东昆仑孜塔格峰冰川区域建立了冰川物质平衡观测站与自动气象观测站,作为典型区校验,基于区域格网数据和遥感数据。本文基于Sentinel-2A/B MSI和Landsat系列遥感影像,Landsat影像提取了1990、2000年和2010年的冰川湖边界,Sentinel-2A/B MSI影像提取了2020、2023年的冰川湖边界。基于GEE平台使用全局-局部阈值分割半自动水体提取法提取冰川湖的边界。该算法首先基于水体归一化算法(Modified normalized difference water index,MNDWI)对获取的灰度图像进行二值化处理并标注研究区所有可能的水体对象[30];然后根据遥感影像对其标注对象建立相同的缓冲区;最后用最大类间方差算法(Otsu algorithm, OSTU)对建立的缓冲区图像进行二次分割[31-32],获取更为精准的冰川湖边界,在计算前剔除了坡度大于20°及地形阴影大于0.25的像素。考虑遥感影像空间分辨率的影响和气候因素容易造成较小冰川湖消失,以保证数据的准确性,删除面积小于0.01 km²的冰川湖。由于本文需要获取近30 a的影像数据集,时间序列较长,1990年的遥感影像主要是人为下载,再进行详细的人工提取,在冰川湖数据集提取完成后,结合历年卫星影像、在线地图及高山亚洲冰川湖数据集,对获取的结果进行人工目视解译,上述检查后对提取错误的部分进行剔除并补充遗漏的冰川湖,然后结合ArcMap对5期冰川湖数据集进行交互检查,以保证数据的准确性和完整性。为了获取冰湖的体积属性特征,冰湖体积公式由式(1)计算得到[19]:

$$V = 0.104 \times A^{1.42} \tag{1}$$

式中:V为冰川湖体积(km³);A为冰川湖面积(km²)。

考虑到研究区经度跨越4个通用墨卡托投影(Universal Transverse Mercator, UTM)分布带,根据不同经度对应于不同的UTM投影坐标计算冰川湖面积,所有冰川湖面积基于UTM投影坐标系计算获取,计算冰川湖面积变化速率,计算公式为:

$$R = \frac{A_2 - A_1}{A_1} \times 100\% \tag{2}$$

式中:R为冰川湖面积的相对变化速率;A_1、A_2分别为首末2个时间点的冰川湖面积(km²)。

冰川湖的边界存在一定的不确定性,通常与遥感影像本身(如空间分辨率高低、地形阴影与影像质量等)、研究人员的解译和判别经验、冰川湖面积的最小阈值选取等相关。根据Hanshaw等[33]提取的冰川湖面积不确定性估算方法计算冰川湖面积的不确定性误差,公式如下:

$$\delta = \frac{P}{G} \times \frac{G^2}{2} \times 0.6872 \tag{3}$$

式中:δ为冰川湖的面积误差;P为冰川湖周长(m);G为提取冰川湖面积时所用的卫星影像分辨率(m)。

1.3.2 冰川湖类型划分 不同类型的冰川湖通常发生不同的变化,为了区分不同类型冰川湖变化,同时考虑到地形的复杂性和影像的时序性,本文根据坝体类型将其分为冰碛湖和其他坝体冰湖。冰碛湖指以冰碛石作为主要坝体的冰川湖,根据冰川湖所处的位置通常包含终碛湖和侧碛湖。其他坝体类型的冰川湖通常为冰川侵蚀湖、滑坡堰塞湖、基岩坝体湖等多种类型。冰川湖类型主要借助ArcMap和遥感影像进行识别。

1.3.3 冰川湖溃决洪水风险评估 根据全球记录的历史GLOF事件,大部分是由冰碛湖发生的溃决洪水灾害事件占主导地位[34],基于已发生的GLOF事件,发现昆仑山北坡由冰碛湖和冰坝湖引发的溃决

洪水事件占主导。由于冰坝湖是由冰川阻塞形成，其具有较高的重复性和高频率的溃决特性，冰碛湖引发的溃决洪水直接与气候变暖、冰川退缩直接相关，因此，本文研究主要对冰碛湖进行风险评估。

基于改进的GLOF风险评估模型评估昆仑山北坡2023年存在的171个现存冰碛湖的灾害和风险水平[35]。考虑到该模型不适用于有冰碛石覆盖或位于冰川侧面的冰碛湖，因此未将此类冰川湖包含在内。通过对单个冰川湖对象迭代运行，避免了因湖泊流域重叠而造成的误差。该模型定义了3个指数：灾害指数代表冰川湖溃决洪水发生的可能性和潜在幅度；暴露指数代表下游居民和基础设施建设受到的洪水影响程度，在模型中主要考虑冰川湖溃决洪水对下游居民或基础设施可能受到的影响程度，本文根据OSM最新数据通过转化为栅格代入模型计算冰湖溃决洪水的暴露性；风险指数则是灾害指数和暴露指数的函数[36]。冰川湖溃决洪水致灾性是根据4个因素来定义，包括湖泊体积、湖泊上游的流域面积、冰崩/岩崩等因素可能触发冰川湖溃决洪水的可能性（用地形潜力来描述）、冰川湖坝体的平均坡度。冰川湖坝体的坡度被认为是控制坝体稳定性或自毁性的一个重要因素，这些因素集合了目前公认的可能触发冰川湖溃决而引发洪水的过程。

在上述因子计算完成后，利用百分比排序法将所有影响冰川湖溃决洪水灾害水平和风险水平的各因子归一化至0到1，并且假设这些因子对每一个冰川湖触发溃决洪水具有相同的权重（即权重为0.25）计算得出最终的灾害值，风险值也应用了相同的分类法，并根据自然断裂法将其划分为非常低、低、中等、高和非常高5个等级。

2 结果与分析

2.1 昆仑山北坡冰川湖现状、历史变化

通过分析近30 a的冰川湖，结果显示：冰川湖的数量从1990年（248个）到2023年（925个）增加了272.98%，面积从1990年（14.99 km^2）到2023年（54.83 km^2）增加了265.78%。相对于1990年冰川湖的数量增加了677个，面积增加了约39.84 km^2，昆仑山北坡冰川湖的数量和面积整体呈显著增加趋势。1990—2000年冰川湖的数量和面积分别增长了43.95%和69.71%；2000—2010年冰川湖的数量增加了37.82%，面积增加了62.46%；2010—2020年冰川湖的数量和面积分别增长了40.85%和18.85%；2020—2023年冰川湖的数量和面积分别增加了33.48%和11.62%（表1）。由于昆仑山北坡西部海拔高、冰川覆盖面积广、山谷冰川和常年积雪覆盖适宜冰川湖的形成和进一步扩张；东部相对来说地势平坦，多分布面积较大的冰川湖和水库，冰川覆盖面积较少。昆仑山北坡冰川湖分布整体呈西部多、东部少，冰川湖的数量和面积增长显著，未来也将具有显著的扩张潜力。

2.2 昆仑山北坡不同区域冰川湖变化特征

2.2.1 气候变化对冰川湖的影响 自1990年以来，昆仑山北坡的年平均气温由1990年的4.35 ℃增长到2020年的5.01 ℃，升温幅度达0.22 ℃·(10a)$^{-1}$；年降水量由1990年的169.47 mm增长到2020年的206.59 mm，增长率为15.72 mm·(10a)$^{-1}$。通过分析不同流域气温和降水量的变化得出：和田河流域的年均气温和年降水量增幅分别为0.26 ℃·(10a)$^{-1}$和15.30 mm·(10a)$^{-1}$；库木库里盆地的年均气温和年降水量增幅分别为0.19 ℃·（10a）$^{-1}$和30.67 mm·(10a)$^{-1}$；

表1 1990—2023年昆仑山北坡各流域和盆地冰川湖数量与面积统计

Tab. 1 Statistics of the number and area of glacial lakes in the watersheds and basins on the northern slope of Kunlun Mountains from 1990 to 2023

/km^2

年份	叶尔羌河流域	和田河流域	克里雅河流域	车尔臣河流域	库木库里盆地	总和
1990	3.04±0.07（59）	7.07±0.17（81）	2.18±0.10（35）	1.38±0.04（45）	1.30±0.04（28）	14.99±0.12（248）
2000	3.46±0.07（80）	10.78±0.18（123）	4.87±0.12（42）	4.22±0.23（70）	2.11±0.04（42）	25.44±0.17（357）
2010	5.44±0.06（146）	20.28±0.76（170）	5.45±0.18（60）	7.21±0.69（60）	2.95±0.06（56）	41.33±0.52（492）
2020	8.79±0.06（212）	23.14±0.74（221）	6.68±0.15（101）	6.41±0.45（68）	4.12±0.05（92）	49.12±0.45（693）
2023	10.23±0.05（285）	25.34±0.64（295）	7.74±0.14（115）	5.22±0.30（75）	6.29±0.05（155）	54.83±0.38（925）

注：括号中数值为冰川湖的数量。

克里雅河流域的年均气温和年降水量增幅分别为0.22 ℃·(10a)$^{-1}$和12.12 mm·(10a)$^{-1}$;车尔臣河流域的年均气温和年降水量增幅分别为0.29 ℃·(10a)$^{-1}$和12.98 mm·(10a)$^{-1}$;叶尔羌河流域的年均气温和年降水量增幅分别为0.22 ℃·(10a)$^{-1}$和22.34 mm·(10a)$^{-1}$。库木库里盆地在5个流域中年降水量增幅最大为30.67 mm·(10a)$^{-1}$,但其年均气温增幅最小;其次是叶尔羌河流域为22.34 mm·(10a)$^{-1}$,年降水量增幅最小的是克里雅河流域[12.12 mm·(10a)$^{-1}$]和车尔臣河流域[12.98 mm·(10a)$^{-1}$](图2)。随着气候变暖,昆仑山北坡山区气温和降水显著增加,未来冰川湖的数量和面积也将呈持续增加趋势。

通过分析不同流域冰川湖的数量和面积(图3)发现:在昆仑山北坡5个流域中,和田河流域和叶尔羌河流域的冰川湖数量约占整个研究区的56.45%~64.23%,冰川湖面积约占整个研究区的55.97%~67.44%;克里雅河流域冰川湖的数量和面积分别约占总体的11.76%~14.57%和13.18%~

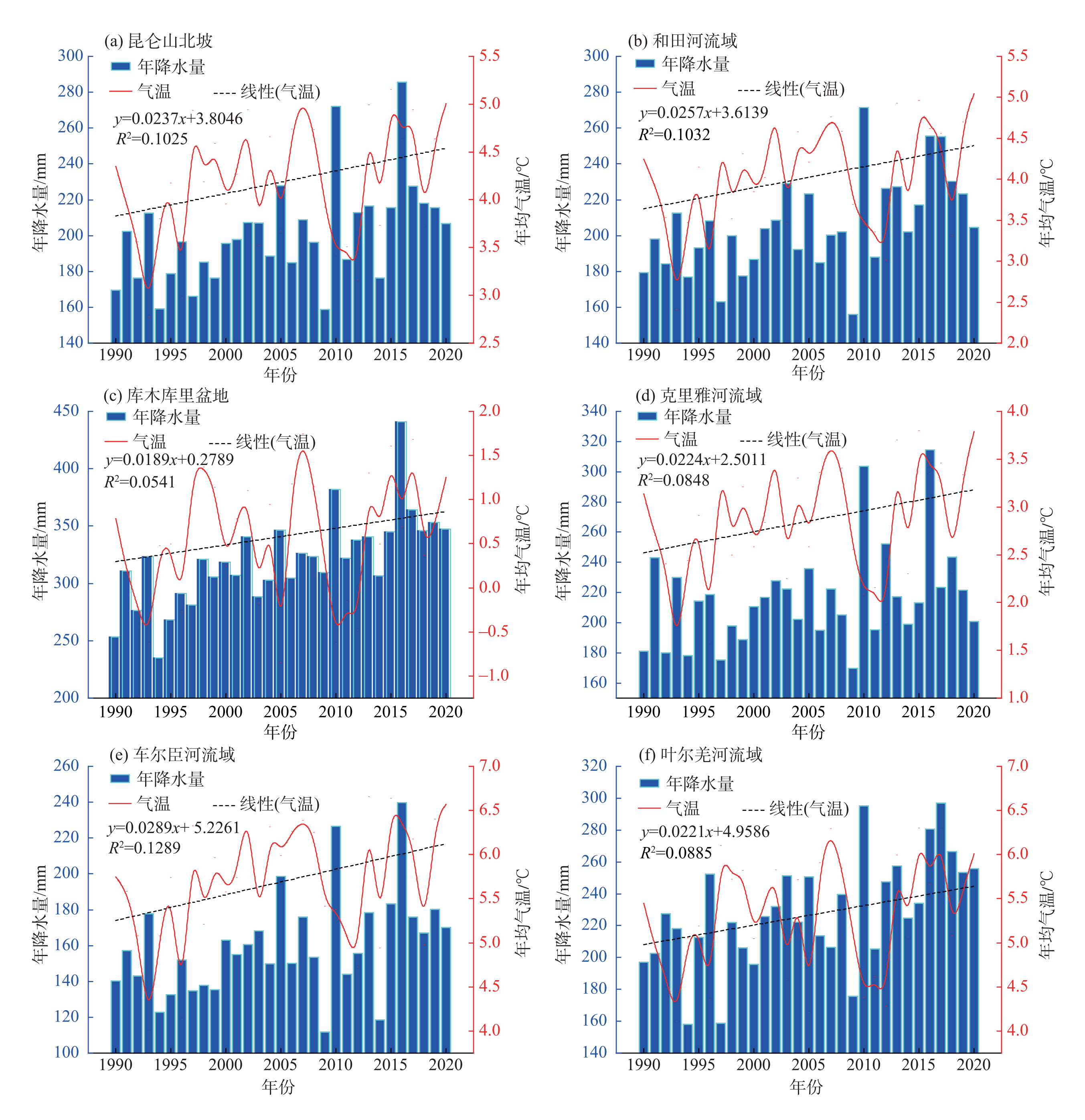


图2 1990—2020年昆仑山北坡各流域和盆地气候要素变化

Fig. 2 Changes in climate factors on the northern of Kunlun Mountains in the watersheds and basins from 1990 to 2020

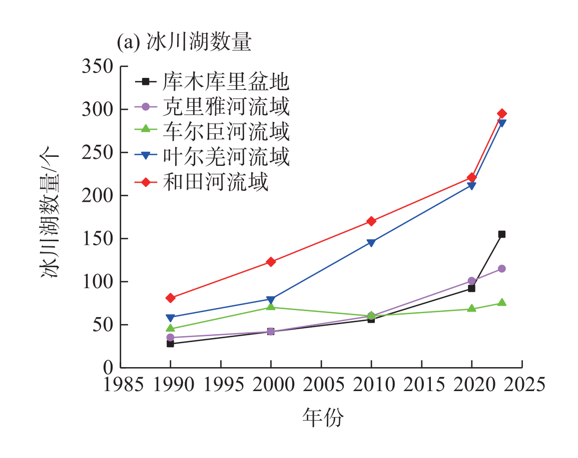
19.14%。其中和田河流域冰川湖的数量和面积占比最大，冰川湖的数量约占整个研究区的31.89%~34.55%，冰川湖的面积占总体的42.37%~49.07%；叶尔羌河流域冰川湖的数量与面积分别占整个研究区的22.41%~30.81%和13.16%~20.28%；库木库里盆地冰川湖的面积最少，约占总面积的8.67%~11.57%。

2.2.2 不同流域冰川面积变化 利用Landsat遥感影像，基于比值法与目视解译法，提取昆仑山北坡冰川边界。从1990—2020年期间，昆仑山北坡2020年的冰川条数和面积相对1990年分别减少了0.87%和0.88%，冰川面积和数量总体趋于稳定[37]。在昆仑山北坡不同的流域中，随着气温升高，在1990—2010年期间，昆仑山北坡的冰川面积整体呈减少趋势（表2），其中和田河流域和车尔臣河流域的冰川面积呈负增长趋势最显著，分别为−13.33 $km^2·(10a)^{-1}$和−10.47 $km^2·(10a)^{-1}$，其次是库木库里盆地。但在2010—2020年期间，和田河流域与克里雅河流域冰川面积呈增加趋势，增速分别为14.93 $km^2·(10a)^{-1}$和4.67 $km^2·(10a)^{-1}$。值得注意的是，20世纪以来，车尔臣河流域、叶尔羌河流域和库木库里盆地冰川面积一直呈减少趋势，分别为−6.88 $km^2·(10a)^{-1}$、−6.61 $km^2·(10a)^{-1}$和−10.65 $km^2·(10a)^{-1}$（图4）。

2.3 昆仑山北坡冰川湖溃决洪水风险分析

2.3.1 昆仑山北坡冰川湖溃决洪水风险 本文使用改进的GLOF风险评估模型定量评估了2023年昆仑山北坡现存的171个冰碛湖的GLOF风险和灾害水平（图5）。评估结果表明昆仑山北坡具有30.7%的冰碛湖非常高和高的灾害水平（约占1/3），其中大多数分布于西部高海拔山区，东部分布较少；冰碛湖灾害水平为低或者较低的约占43.6%，中等灾害水平的冰碛湖约占25.7%。从风险水平来看，具有较高风险的约占20.7%（为29个），低风险水平的冰碛湖约占总体的65%（约为91个），因为该地区洪水溃决路径内无明显的下游基础设施建设，其分布位于海拔较高的山区，居民住宅稀少。对于该区的西部来说，约有18个较高的灾害水平的冰碛湖，但其风险水平较低，因此其溃决洪水的风险度较低。

2.3.2 不同流域溃决洪水风险现状 通过分析5个不同流域冰川湖溃决洪水风险与灾害水平，从灾害水平来看（图6a），叶尔羌河流域高或较高灾害水平



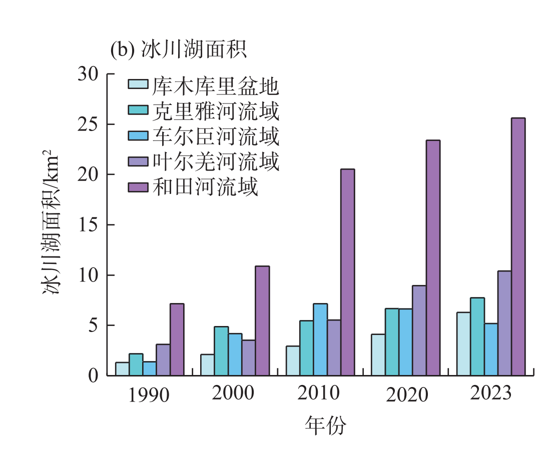


图3　1990—2023年昆仑山北坡各流域和盆地冰川湖数量和面积变化

Fig. 3　Changes in the number and area of glacial lakes in the watersheds and basins on the northern slope of Kunlun Mountains from 1990 to 2023

表2　1990—2020年昆仑山北坡各流域和盆地冰川面积变化

Tab. 2　Changes in glacier area in the watersheds and basins on the northern slope of Kunlun Mountains from 1990 to 2020

/km²

年份	和田河流域	车尔臣河流域	克里雅河流域	库木库里盆地	叶尔羌河流域
1990	5074.61	1055.07	1170.48	654.87	6111.33
2000	5060.55	1021.33	1169.08	638.97	5672.91
2010	5041.34	1025.36	1163.84	637.74	5480.79
2020	5064.35	1023.87	1172.30	629.89	4987.08

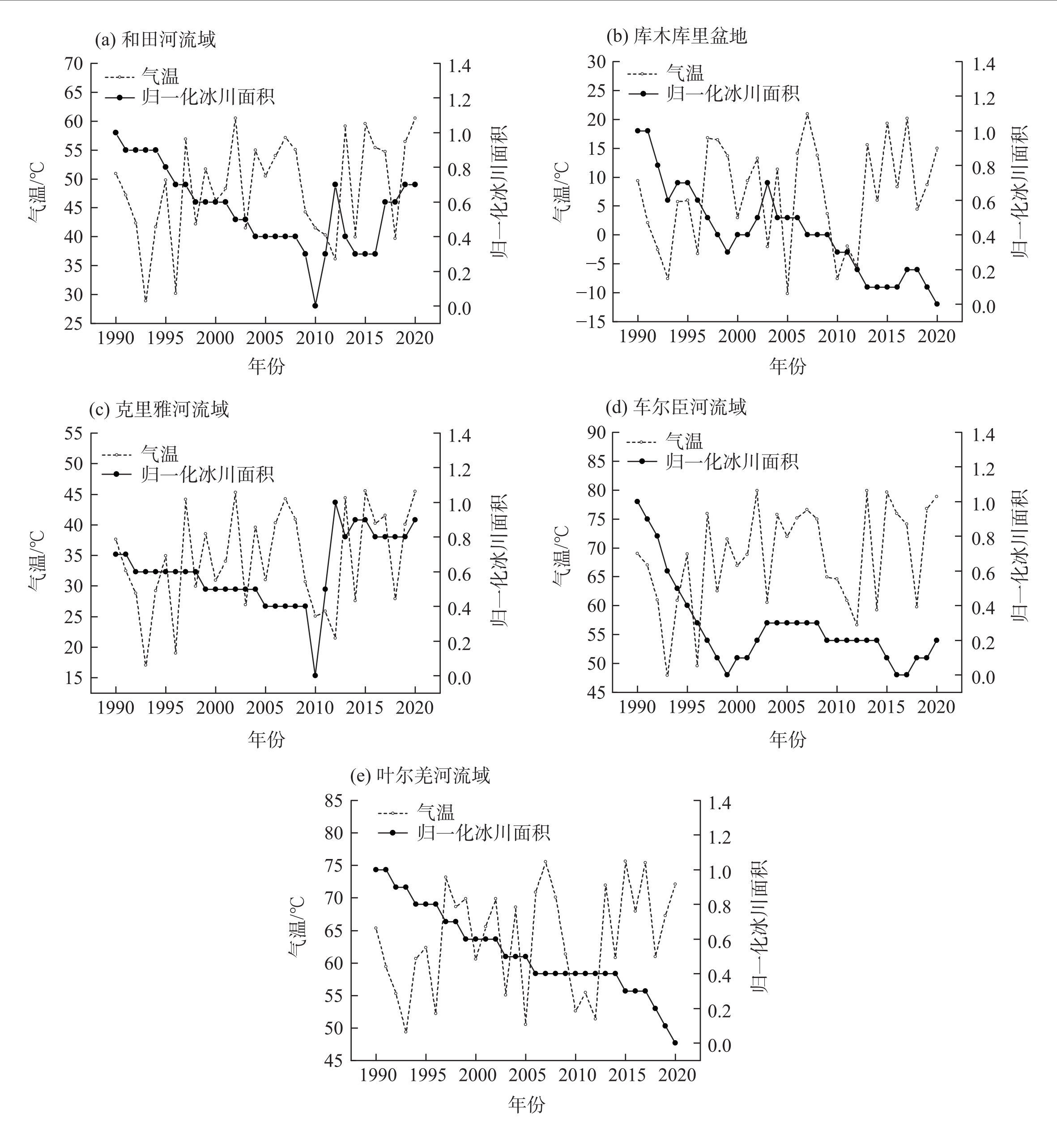


图4 1990—2020年昆仑山北坡各流域和盆地气温与冰川面积变化

Fig. 4 Changes in temperature and glacier area in the watersheds and basins on the northern slope of Kunlun Mountains from 1990 to 2020

的冰碛湖是其他流域的5~14倍，其次是和田河流域。车尔臣河流域与库木库里盆地较低或低灾害水平达到该流域的42.6%，克里雅河流域处于高或较高灾害水平占1/6。同样地，从风险水平来看(图6b)，叶尔羌河流域具有高风险或较高风险水平的冰碛湖约占60.7%，而在和田河流域，具有较高风险冰碛湖的数量占总数的1/5；车尔臣河流域具有高灾害水平冰碛湖的数量占1/5，但大部分处于低风险水平；库木库里盆地风险水平最小，车尔臣河流域与库木库里盆地低风险或较低风险水平冰碛湖的数量占38.46%，说明该区域发生冰湖溃决洪水的风险程度最小，主要风险较高发生在昆仑山北坡西部地区。

3 讨论

3.1 多源遥感影像对冰湖提取影响

冰川湖主要位于高海拔山区，冰川覆盖范围较广，人工实地探测存在一定的困难。随着遥感技术的成熟，遥感给高寒山区实地探测和较大范

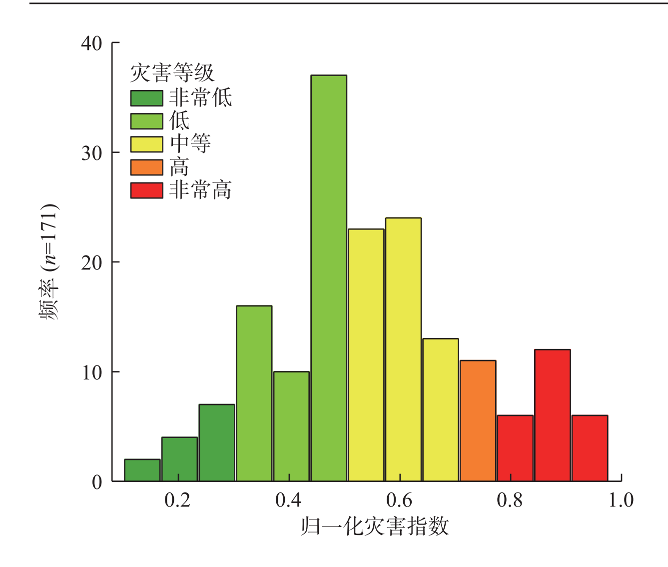
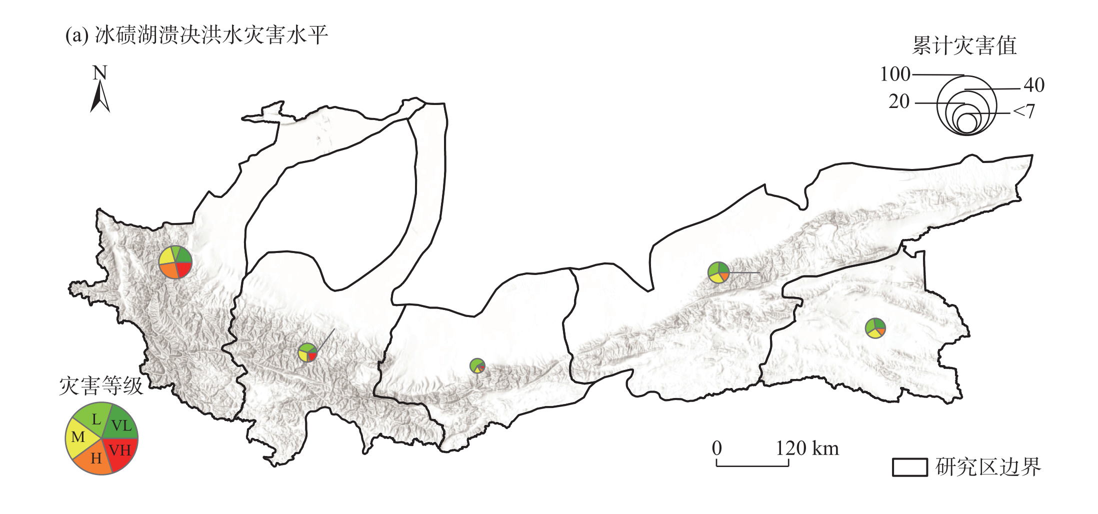


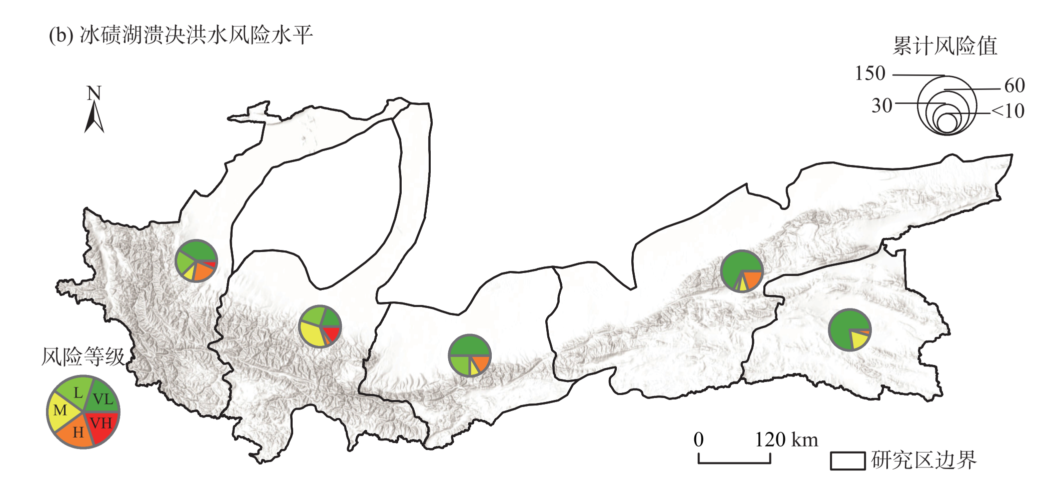
图5　2023年冰碛湖溃决洪水灾害水平分布

Fig. 5　Distribution of glacial lake outburst flood (GLOF) disasters in 2023

围收集数据带来了极大便利，但不同空间分辨率的遥感影像、人工目视解译经验的不同、冰湖提取阈值设置等影响，使其对冰湖边界提取存在一定的不确定性[38]。

为了评估基于GEE计算平台提取冰川湖的面积是否符合实际，我们根据科考实测数据对昆仑山北部实测的冰川湖面积与通过GEE提取的冰川湖的面积进行误差分析，选用了阿牙克库木湖、阿其克库勒湖和鲸鱼湖3个湖泊，根据2020年的遥感影像提取湖泊的面积(表3)。阿牙克库木湖冰川湖的面积真实值为1130.26 km²，由10 m高分辨率影像Sentinel-2A/B MSI提取的冰湖面积为1108.54 km²，误差为1.93%，空间分辨率为15 m的Landsat影像中提取的面积误差为2.11%，空间分辨率为30 m的Landsat影像中提取的面积与真实面积误差为





注：饼图表示不同流域GLOF灾害水平和风险水平的比例；VH为非常高；H为高；M为中等；L为低；VL为非常低。

图6　2023年昆仑山北坡冰碛湖灾害和风险变化

Fig. 6　Hazards and risk changes of moraine lakes on the northern slope of Kunlun Mountains in 2023

表3 2020年不同分辨率图像提取的冰川湖面积及误差

Tab. 3 Areas and errors of glacial lakes extracted from different resolution images in 2020

冰川湖	Sentinel-2A/B MSI 10 m		Landsat OLI 15 m		Landsat OLI 30 m	
	面积/km^2	误差/%	面积/km^2	误差/%	面积/km^2	误差/%
阿牙克库木湖	1108.54	1.93	1106.45	2.11	1105.04	2.22
阿其克库勒湖	596.65	2.47	596.40	2.51	596.13	2.56
鲸鱼湖	384.31	0.45	385.90	0.86	386.09	0.91

2.22%；2020年阿其克库勒湖的湖泊真实值为611.7 km^2，10 m影像提取的湖泊面积为596.65 km^2，误差为2.47%，由15 m影像提取的面积误差为2.51%，30 m的图像中提取的面积误差为2.56%；2020年鲸鱼湖的真实值为382.6 km^2，从分辨率为10 m的图像中提取的面积为384.31 km^2，误差为0.45%；由Landsat 15 m和30 m影像中提取的湖泊面积误差分别为0.86%和0.91%。

综上所述，通过不同空间分辨率影像提取的冰川湖进行面积误差分析发现，空间分辨率越低，误差就越大。在本文中，所有提取的冰湖面积误差均小于3.5%，均在允许的误差范围。因此，从不同遥感影像中提取冰湖边界是完全可行的。

3.2 气候和冰川消融是驱动冰川湖扩张的因素

由于气候条件多样，地形复杂，昆仑山北坡冰川湖分布具有显著的空间异质性[23]。通过对气候变化与冰川湖的变化特征分析发现，自19世纪以来，在全球气候变暖的背景下，中国西北干旱区升温显著，年均气温以0.34 ℃·$(10a)^{-1}$的速率上升。昆仑山北坡气温和降水呈明显增加趋势，冰川面积和数量整体上趋于稳定。

值得注意的是昆仑山北坡冰川面积自1990—2010年以来，昆仑山北坡冰川消融在增加，其中在和田河流域与克里雅河流域冰川面积减少较显著，和田河流域冰川面积从1990年的5074.61 km^2减少到2010年的5041.34 km^2（约为-0.66%），克里雅和流域冰川面积从1990年的1170.48 km^2减少到2010年的1163.84 km^2（约为-0.57%），2010—2022年该区域的冰川数量和面积开始呈增加趋势。

3.3 潜在危险和风险评估

结合历年科考实测洪水资料及相关文献，从1961—2021年，叶尔羌河流域共发生30次冰川湖溃决洪水，主要以冰川融水补给为主，年际变化大，每年6—9月易发生冰湖溃决洪水灾害，对下游造成极大的破坏和潜在威胁。本文通过对昆仑山北坡冰碛湖进行冰川湖溃决洪水风险评估，主要从冰川湖溃决洪水的致灾性、暴露性和风险性进行定量分析，研究得出在昆仑山北坡西部（叶尔羌河流域和和田河流域）发生潜在溃决洪水灾害性较高；而东部由于海拔较低，冰川湖的数量和面积较小，人口分布相对较少，发生冰湖溃决洪水的灾害水平相对于西部区域较低。利用最新的OSM数据，将下游地区居民点、交通设施、建筑物及土地利用类型等18个指标转化为栅格数据放入模型中对冰碛湖的暴露性进行定量分析（图7），具有较高潜在风险的位于昆仑山北坡的西部，共有40个冰碛湖具有较高风险，占了整体的28.57%，具有较低暴露性的有72个，占整体冰碛湖的51.42%，最后通过灾害指数和暴露指数得出风险指数，暴露指数受到未来社会经济、生态环境及城市发展规模等影响，其溃决洪水造成的风险性也会随着发生改变。本文通过对昆仑山北坡整体冰碛湖（≥0.01 km^2）进行定量评估，未来将深入冰湖溃决洪水对下游地区受到的影响范围、受灾程度及模拟进一步深入研究。

4 结 论

（1）通过选取昆仑山北坡面积≥0.01 km^2的冰川湖进行分析，自1990—2023年以来，昆仑山北坡冰湖数量与面积总体呈显著增加，冰川湖的数量从1990年（248个）增加到2023年（925个），增加了2.73倍，面积增长了2.66倍；昆仑山北坡冰川湖分布存在明显的空间异质性，昆仑山北坡冰川湖主要分布在西部高海拔地区（如和田河流域、叶尔羌河流域），东部地区冰川湖分布较少。

（2）通过对2023年昆仑山北坡冰碛湖（171个）进行风险与灾害评估分析，当前GLOF事件风险水平较高的位于昆仑山北坡西部（叶尔羌河流域、和田河流域），风险水平低的多分布在昆仑山北坡东

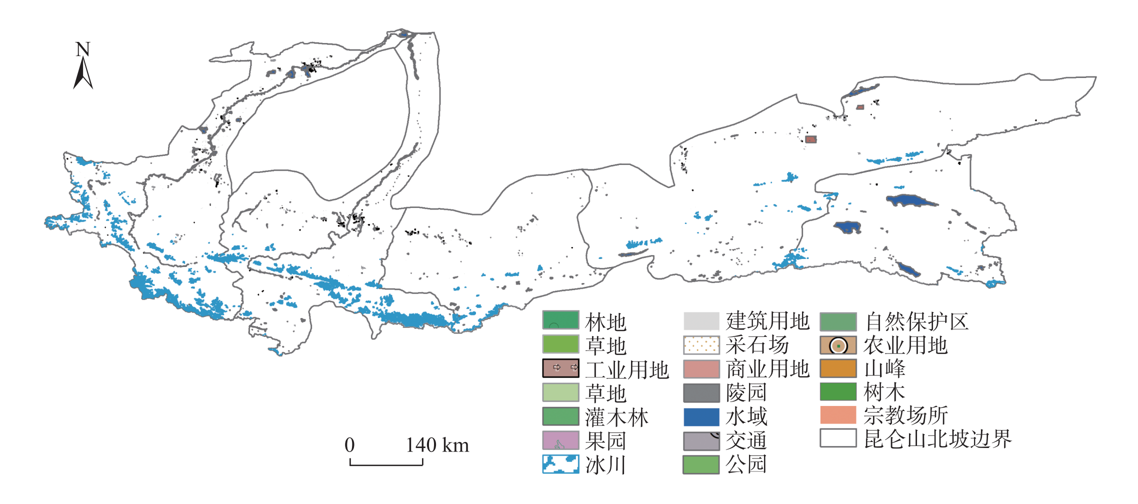


图7　昆仑山北坡OSM数据空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of OSM data on the northern slope of the Kunlun Mountains

部地区。而灾害水平较显著的位于叶尔羌河流域，其次是和田河流域，东部地区危害水平较低。对于昆仑山北坡GLOF风险分析可以对未来的区域土地利用规划和防灾预警提供依据，促进区域经济生态可持续发展。

（3）冰川湖在时间分布上，通过与气候分析发现，气候变化导致冰川湖区域异质性差异显著，冰川湖的变化主要由气温和降水引起的，气温波动是导致降水增加、冰川退缩、积雪消融的主要因素，在全球变暖的背景下，未来冰川湖进一步扩张，GLOF的潜在威胁也将增大。

参考文献(References)

[1] Zhang T, Wang W, An B, et al. Enhanced glacial lake activity threatens numerous communities and infrastructure in the Third Pole[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 8250, doi:10.1038/s41467-023-44123-z.

[2] Nie Y, Deng Q, Pritchard H D, et al. Glacial lake outburst floods threaten Asia's infrastructure[J]. Science Bulletin, 2023, 68(13): 1361-1365.

[3] Shugar D H, Burr A, Haritashya U K, et al. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(10): 939-945.

[4] Harrison S, Kargel J S, Huggel C, et al. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods[J]. The Cryosphere, 2018, 12(4): 1195-1209.

[5] 雷鹏嗣, 王伟财, 张太刚. 1990—2020年那曲地区冰湖变化研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(6): 936-944. [Lei Pengsi, Wang Weicai, Zhang Taigang. Changes in glacial lakes in Naqu from 1990 to 2020[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2022, 58(6): 936-944.]

[6] Bazai N A, Cui P, Carling P A, et al. Increasing glacial lake outburst flood hazard in response to surge glaciers in the Karakoram[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 212: 103432, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103432.

[7] Zhang Q, Chen Y, Li Z, et al. Glacier changes from 1975 to 2016 in the Aksu River Basin, central Tianshan Mountains[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(6): 984-1000.

[8] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 18-26. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 18-26.]

[9] 陈亚宁, 朱成刚, 李稚, 等. 昆仑山北坡区域高质量发展面临的问题、机遇与挑战[J]. 干旱区地理, 2024, 47(5): 733-740. [Chen Yaning, Zhu Chenggang, Li Zhi, et al. High-quality development in the northern slope of the Kunlun Mountains: Issues, opportunities and challenges[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(5): 733-740.]

[10] 王根绪, 程国栋, 徐中民. 中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题[J]. 自然资源学报, 1999, 14(2): 109-116. [Wang Genxu, Cheng Guodong, Xu Zhongmin. The utilization of water resource and its influence on eco environment in the northwest arid area of China[J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(2): 109-116.]

[11] Rawat M, Jain S K, Ahmed R, et al. Glacial lake outburst flood risk assessment using remote sensing and hydrodynamic modeling: A case study of Satluj Basin, Western Himalayas, India[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(14): 41591-41608.

[12] Carrivick J L, Tweed F S. A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods[J]. Global and Planetary Change, 2016, 144: 1-16.

[13] 常鸣, 唐川, 窦向阳. 藏东南典型冰湖溃决机制及危险性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 115-121. [Chang Ming, Tang Chuan, Dou Xiangyang. Mechanism and hazards of typical glacial-lake burst in the southern Tibet[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 115-121.]

[14] 陈亚宁, 李忠勤, 徐建华, 等. 中国西北干旱区水资源与生态环境变化及保护建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 385-393. [Chen Yaning, Li Zhongqin, Xu Jianhua, et al. Changes and protection suggestions in water resources and ecological environment in arid region of northwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 385-393.]

[15] 努尔比亚·吐尼牙孜, 米日古丽·米吉提, 毛炜峄, 等. 1961—2021年叶尔羌河流域克亚吉尔冰湖溃决洪水变化特征[J]. 冰川冻土, 2023, 45(4): 1288-1299. [Tunyaz Nurbiya, Mijit Mihrigul, Mao Weiyi, et al. Variation characteristics of Kyagar Glacial Lake outburst floods in the Yarkand River Basin from 1961 to 2021[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(4): 1288-1299.]

[16] 王翔, 陈果, 戴晓爱, 等. 藏西南典型危险性冰湖监测与泥石流溃决模拟[J]. 山地学报, 2021, 39(5): 687-700. [Wang Xiang, Chen Guo, Dai Xiaoai, et al. Typical monitoring of dangerous glacial lakes in southwestern Tibet, China and simulation of GLOF debris flow[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 39(5): 687-700.]

[17] Drenkhan F, Guardamino L, Huggel C, et al. Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba Basin, Peruvian Andes[J]. Global and Planetary Change, 2018, 169: 105-118.

[18] 赵万玉, 陈晓清, 刘建康, 等. 冰川终碛湖溃决-再生特征与机理[J]. 山地学报, 2015, 33(6): 703-712. [Zhao Wanyu, Chen Xiaoqing, Liu Jiankang, et al. Outburst-regeneration characteristic and mechanism of glacier lake[J]. Journal of Mountain Science, 2015, 33(6): 703-712.]

[19] 丁悦凯, 刘睿, 张翠兰, 等. 喜马拉雅地区叶如藏布流域冰川和冰湖变化遥感监测研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1870-1880. [Ding Yuekai, Liu Rui, Zhang Cuilan, et al. Remote sensing monitoring of glacier and glacial lake changes in Yairu Zangbo Basin, Himalayas[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1870-1880.]

[20] 汤远航, 李梦琦, 邓铃, 等. 1990—2020年朋曲流域冰川变化及其对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 27-36. [Tang Yuanhang, Li Mengqi, Deng Ling, et al. Glacier change and its response to climate change in Pumqu Basin during 1990—2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 27-36.]

[21] Zhang G, Zheng G, Gao Y, et al. Automated water classification in the Tibetan Plateau using Chinese GF-1 WFV data[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2017, 83(7): 509-519.

[22] Li J, Sheng Y. An automated scheme for glacial lake dynamics mapping using Landsat imagery and digital elevation models: A case study in the Himalayas[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(16): 5194-5213.

[23] 孟乘枫, 仲涛, 郑江华, 等. 昆仑山冰湖分布时空特征及驱动力[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1094-1106. [Meng Chengfeng, Zhong Tao, Zheng Jianghua, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics and driving forces of Kunlun glacial lakes[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7): 1094-1106.]

[24] 马俊学, 陈剑, 崔之久, 等. 基于HEC-RAS及GIS的川西叠溪古滑坡堰塞湖溃决洪水重建[J]. 现代地质, 2022, 36(2): 610-623. [Ma Junxue, Chen Jian, Cui Zhijiu, et al. HEC-RAS-/GIS-based paleohydraulic reconstruction of the Diexi Ancient landslide-dammed lake outburst flood in western Sichuan Province[J]. Modern Geology, 2022, 36(2): 610-623.]

[25] Zhang Q, Chen Y, Li Z, et al. Recent changes in water discharge in snow and glacier melt-dominated rivers in the Tienshan Mountains, Central Asia[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2704, doi: 10.3390/rs12172704.

[26] 朱军涛, 李向义, 张希明, 等. 昆仑山北坡前山带塔里木沙拐枣对不同海拔生境的生理生态响应[J]. 生态学报, 2010, 30(3): 602-609. [Zhu Juntao, Li Xiangyi, Zhang Ximing, et al. Ecophysiological response of *Calligonum roborovskii* to the habitats in different altitudes in north slope of Kunlun Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3): 602-609.]

[27] 许有鹏, 杨戍. 昆仑山北坡河流水文水资源特征研究[J]. 地理科学, 1994(4): 338-346, 390. [Xu Youpeng, Yang Shu. Approach to water resource characteristics of rivers in north slope area of the Kunlun Mountains[J]. Scientia Geographica Sinica, 1994(4): 338-346, 390.]

[28] Guo H, Bao A, Liu T, et al. Determining variable weights for an optimal scaled drought condition index (OSDCI): Evaluation in Central Asia[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 231: 111220, doi: 10.1016/j.rse.2019.111220.

[29] 王欣. 中国西部冰湖编目数据[DB/OL]. [2015]. https://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/c2f98aeb-078e-4f96-afab-828e1436600b. [Wang Xin. Inventory data of glacial lake in west China[DB/OL]. [2015]. https://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/c2f98aeb-078e-4f96-afab-828e1436600b.]

[30] 刘垚燚, 田恬, 曾鹏, 等. 基于Google Earth Engine平台的1984—2018年太湖水域变化特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 3163-3172. [Liu Yaoyi, Tian Tian, Zeng Peng, et al. Surface water change characteristics of Taihu Lake from 1984—2018 based on Google Earth Engine[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9): 3163-3172.]

[31] 刘小燕, 崔耀平, 史志方, 等. GEE平台下多源遥感影像对洪灾的监测[J]. 遥感学报, 2023, 27(9): 2179-2190. [Liu Xiaoyan, Cui Yaoping, Shi Zhifang, et al. Monitoring of floods using multi-source remote sensing images on the GEE platform[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(9): 2179-2190.]

[32] 彭妍菲, 李忠勤, 姚晓军, 等. 基于多源遥感数据和GEE平台的

博斯腾湖面积变化及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(6): 1131−1153. [Peng Yanfei, Li Zhongqin, Yao Xiaojun, et al. Area change and cause analysis of Bosten Lake based on multi-source remote sensing data and GEE platform[J]. Journal of Geo-Information Science, 2021, 23(6): 1131−1153.]

[33] Hanshaw M N, Bookhagen B. Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: Status ofthe Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru[J]. The Cryosphere, 2014(8): 359−376.

[34] Veh G, Korup O, Von Specht S, et al. Unchanged frequency of moraine-dammed glacial lake outburst floods in the Himalaya[J]. Nature Climate Change, 2019, 9(5): 379−383.

[35] Zheng G, Bao A, Allen S, et al. Numerous unreported glacial lake outburst floods in the Third Pole revealed by high-resolution satellite data and geomorphological evidence[J]. Science Bulletin, 2021, 66(13): 1270−1273.

[36] Allen S K, Zhang G, Wang W, et al. Potentially dangerous glacial lakes across the Tibetan Plateau revealed using a large-scale automated assessment approach[J]. Science Bulletin, 2019, 64(7): 435−445.

[37] 朱成刚, 陈亚宁, 张明军, 等. 昆仑山北坡水资源科学考察初报[J]. 干旱区地理, 2024, 47(7): 1097−1105. [Zhu Chenggang, Chen Yaning, Zhang Mingjun, et al. Preliminary report on scientific investigation of water resources on the northern slope of Kunlun Mountains[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(7): 1097−1105.]

[38] Zhang M, Chen F, Guo H, et al. Glacial lake area changes in High Mountain Asia during 1990—2020 using satellite remote sensing[J]. Research, 2022, 2022(10): 9821275, doi: 10.34133/2022/9821275.

Changes in glacial lakes on the northern slope of Kunlun Mountains and assessment of their outburst risks

CHEN Man[1], CHEN Yaning[2], FANG Gonghuan[2], LI Yupeng[2], SUN Huilan[1]

(1. College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: The exploration of spatiotemporal changes in glacial lakes on the northern slope of Kunlun Mountains and the risk assessment of glacier lake outburst floods (GLOF) are of great significance for regional water resource security and ecological development. Using the Google Earth Engine (GEE) remote sensing platform, this study analyzed changes in glacial lakes on the northern slope of Kunlun Mountains over the past 30 years and applied a GLOF risk assessment model to evaluate current moraine lakes for disaster risk. The results indicate the following: (1) From 1990 to 2023, the number and area of glacial lakes on the northern slope of Kunlun Mountains increased significantly. By 2023, the number of glacial lakes had risen to 925, marking a 2.73-fold increase from 248 in 1990. Similarly, the area of glacial lakes expanded to 54.83 km^2, a 2.66-fold increase from 14.99 km^2 in 1990. This growth was particularly notable in the high-altitude mountainous regions of the western part of the northern slope. (2) The 2023 GLOF risk assessment indicates that the Yarkant River Basin poses the highest disaster risk, accounting for approximately 47.2% of the assessed area, followed by the Hotan River Basin at 15.7%. In terms of risk levels, the Yarkant River Basin shows a relatively high-risk, accounting for about 50.8%, and high-risk glacial lakes in the Yarkant River Basin glacial lakes account for 60.7% of the high-risk glacial lakes on the entire northern slope of the Kunlun Mountains. (3) The increasing trend in glacial lakes from 1990 to 2023 is closely related to regional climate change. Rising temperatures have led to increased precipitation in mountainous areas and accelerated the melting of glaciers and snow, which are the primary drivers of glacial lake expansion. The GLOF risk assessment contributes to the sustainable management of water resources in arid regions and provides a scientific basis for disaster prevention and early warning systems in downstream areas.

Key words: glacial lakes; outburst flood disaster; risk assessment; northern slope of Kunlun Mountains